

УДК 550.380.25

Лазарева Е. А., Паров С.В., Кульков Д.С.
Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке,
г. Бишкек, Кыргызстан

ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД УЧТУРФАНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 22 ЯНВАРЯ 2024 ГОДА

Аннотация. В работе рассматриваются особенности геомагнитных аномалий, которые наблюдались 22 января 2024 г. во время землетрясения, магнитудой $M_w=6.9$, произошедшего на территории Китая в уезде Уши (Учтурфан), округа Аксу. Для анализа вариаций геомагнитного поля были использованы 1-секундные измерения трёх станций международной сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET, а также данные по геомагнитной обсерватории «Алма-Ата». Проведён анализ изменения компонент геомагнитного поля и их производных по времени в зависимости от местоположения станций и эпицентра землетрясения. Геомагнитный эффект землетрясения проявляется в виде высокочастотных колебаний как в исходных записях компонент, так и на графиках их производных. Наиболее отчётливо эффект заметен в данных горизонтальной компоненты dX/dt . Рассмотренные эффекты землетрясения подтверждаются приходом сейсмической волны, зафиксированным на ближайших к магнитным обсерваториям сейсмостанциях.

Ключевые слова: геомагнитное поле, компонента, данные, землетрясение, магнитуда, геомагнитный эффект, вариация, производная

УЧТУРФАҢДА 2024-ЖЫЛДЫН 22 ЯНВАРЬ АЙЫНДА БОЛГОН ЖЕР ТИТИРӨӨ УЧУРУНДА ГЕОМАГНИТТИК ТАЛААНЫН ВАРИАЦИЯЛАР

Кыскача мазмуну. Макалада, Кытай аймагында Уши (Учтурфан, Аксу районунда), 2024-жылдын 22-январь күнү магнитудасы $M_w=6.9$ болгон жер титирөө учурунда байкалган геомагниттик талаанын аномалдуу вариациялары талкууланды. INTERMAGNET эл аралык тармагынын үч обсерваториясынын геомагниттик талаанын 1-секундалык өлчөөлөрү, ошондой эле «Алма-Ата» геомагниттик обсерваториясынын маалыматтары колдонулган. Геомагниттик талаанын негизги компонентинин жана алардын туундуларынын обсерватория менен жер титирөөнүн эпицентринин ортосундагы аралыкка жараша өзгөрүү анализи жүргүзүлдү. Жер титирөө геомагниттик талаанын жана анын туундусунун жогорку жыштыктагы термелүүлөрү түрүндө байкалды. Тагыраак айтканда, геомагниттик эффект горизонталдык компонентасынын туундуларында dX/dt өзгөчө жакшы көрүндү. Жер титирөөдүн таасири сейсмикалык толкундун келиши менен синхрондуу түрдө пайда болду, муну магниттик обсерваторияларга жакын сейсмикалык станциялардан алынган толкун формаларынын жазуулары тастыктайт.

Негизги сөздөр: геомагниттик талаа, компонента, маалымат, жер титирөө, магнитуда, геомагниттик эффект, вариация, туунду

GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS DURING THE UQTURPAN EARTHQUAKE ON JANUARY 22, 2024

Abstract. The paper considers the features of the geomagnetic field anomalous variations observed as a result of the earthquake on January 22, 2024, with a magnitude $M_w=6.9$ in China (Uqturpan, Aksu region). As initial data international INTERMAGNET network 1-second geomagnetic field measurements from three observatories were used, as well as data from the Alma-Ata geomagnetic station. The changes in the geomagnetic field's main components and their

time derivatives are analyzed depending on the distances between the observatory and the earthquake epicenter. The geomagnetic effects of the earthquake are presented in the form of high-frequency oscillations in the initial records of the components and in the graphs of their derivatives. The effect is most clearly visible on the horizontal component dX/dt data. The considered effects of the earthquake are confirmed by the arrival of a seismic wave recorded at the seismic stations closest to the magnetic observatories.

Keywords: geomagnetic field, component, data, earthquake, magnitude, geomagnetic effect, variation, derivative

Введение. Изменения в магнитном поле Земли, связанные с тектоническими процессами, являются предметом научных дискуссий с середины XX века, поскольку они могут дать важные сведения о механизмах землетрясений и предвестниках сейсмической активности. В одной из первых публикаций (1966 г.), посвящённых изучению влияния сейсмических процессов на магнитное поле Земли, было показано, что наблюдаемые магнитные аномалии могут быть связаны с механическими и электрическими процессами, происходящими в земной коре под воздействием напряжений [1]. Подобные исследования заложили основу для последующих работ, направленных на более глубокое понимание электромагнитных эффектов, возникающих при землетрясениях [2]. С тех пор методы наблюдения и анализа значительно эволюционировали: современные исследования используют высокоточные данные и применяют современные цифровые технологии для обработки сигналов [3]. Эти усовершенствования позволяют более точно связывать изменения в магнитном поле с приходом сейсмических волн, что, в свою очередь, способствует развитию теории сейсмомагнетизма и поиску надёжных предвестников землетрясений. Исследования показывают, что геомагнитный эффект землетрясения подтверждается приходом сейсмической волны, вызывающей локальные изменения в магнитном поле [4]. Это явление может быть обусловлено механическим воздействием волны на породы, обладающие ферромагнитными свойствами, а также электромагнитными процессами, связанными с деформацией литосферы [5]. При изучении геомагнитных эффектов, вызванных землетрясениями, необходимо использование высокочастотных данных основных компонент геомагнитного поля, полученных от наблюдений сети магнитных обсерваторий, осуществляющих измерения по всему миру. Именно данные с 1-секундной дискретизацией позволяют обнаружить на магнитограммах аномальные вариации, связанные с сейсмическими событиями [6].

Данные. Учтурфанское землетрясение, магнитудой $M_w=6.9$ было зафиксировано 22 января 2024 г. в 18:09 UTC на территории Китая, недалеко от границы Кыргызстана, в уезде Уши (Учтурфан) округа Аксу (https://seismo.kg/different/uqturpan_earthquake.php). Это одно из значимых сейсмических событий, привлёкших внимание исследователей не только из-за своей разрушительной силы, но и в связи с его геофизическими последствиями. Только 22 января было зарегистрировано 179 афтершоков, по данным на 23 января – 459 афтершоков, а на 31 марта 2024 г. уже было зафиксировано 3436 толчков [7].

Целью данного исследования является изучение геомагнитного эффекта, связанного с указанным событием. Для анализа вариаций геомагнитного поля в период землетрясения использованы 1-секундные данные трех станций (CYG – Южная Корея, NUR – Финляндия, THY – Венгрия), входящих в состав Международной сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET, которая обеспечивает высокоточную регистрацию вариаций магнитного поля Земли (<https://intermagnet.org/>), а также данные геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» (AAA – Казахстан).

Выделение косейсмических эффектов на фоне других геомагнитных возмущений – одна из ключевых проблем в этом направлении исследований. Для того чтобы понять, связаны ли наблюдаемые аномальные геомагнитные вариации с приходом сейсмической

волны, были проанализированы сейсмограммы землетрясения за 22 января 2024 г. по данным сейсмических станций, которые наиболее близко расположены к магнитным обсерваториям. Для выбора сейсмостанций использовались данные Международной федерации сетей цифровых сейсмографов FDSN (<http://www.fdsn.org/networks/>). Волновые формы события были зафиксированы на следующих сейсмических станциях: TJN – Южная Корея, OUL – Финляндия, MPLH – Венгрия, KBK – Кыргызстан.

На рисунке 1 приведена карта местоположения выбранных геомагнитных обсерваторий, а также сейсмических станций.

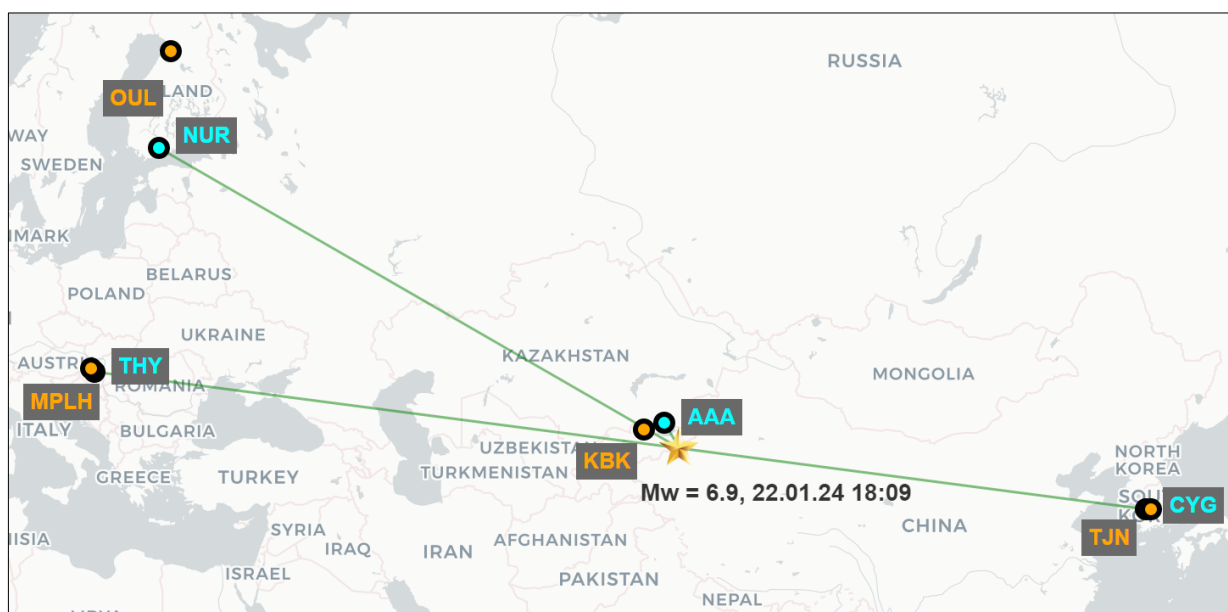


Рисунок 1. Карта расположения выбранных обсерваторий (бирюзовые метки) и сейсмостанций (оранжевые метки) с эпицентром землетрясения (звёздочка).

Данные о расстоянии от выбранных обсерваторий до источника землетрясения приведены в таблице 1, а также указаны расстояния между геомагнитными и сейсмическими станциями. Следует отметить, что обсерватории сети INTERMAGNET удалены от эпицентра землетрясения на расстояние более 4000 км.

Таблица 1 – Расстояния (км) от рассматриваемых обсерваторий до эпицентра землетрясения.

| Страна | Код геомагнитной обсерватории | Расстояние от магнитной обсерватории до эпицентра | Код сейсмостанции | Расстояние между магнитной и сейсмической станциями |
|-------------|-------------------------------|---|-------------------|---|
| Казахстан | AAA | 263.7 | KBK | 173.98 |
| Южная Корея | CYG | 4167.54 | TJN | 45.51 |
| Финляндия | NUR | 4199.00 | OUL | 513.92 |
| Венгрия | THY | 4784.75 | MPLH | 40.02 |

Согласно данным аналитического центра по геомагнетизму и космическому магнетизму (Kyoto, Japan), средние значения DST-индекса в период с 20 по 25 января 2024 г. составляли в среднем от -15 нТл до 14 нТл (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202401/index.html), что свидетельствует об отсутствии сильных

магнитных возмущений в это время и дает основание интерпретировать аномальные вариации геомагнитного поля в период землетрясения как сейсмoeлектрический эффект.

Одним из методов выделения высокочастотных вариаций на фоне медленных изменений является расчет производной от исходного сигнала [8]. Соответствующие скорости изменения хода геомагнитного поля dX/dt , dY/dt , dZ/dt были рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned} dX(i) &= (X(i+1) - X(i-1)) / 2 \\ dY(i) &= (Y(i+1) - Y(i-1)) / 2, \\ dZ(i) &= (Z(i+1) - Z(i-1)) / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

где X , Y , Z – составляющие вектора магнитной индукции, i – текущий отсчет времени.

Чтобы оценить геомагнитный эффект рассматриваемых землетрясений на станциях сети INTERMAGNET, были проанализированы исходные данные односекундных измерений компонент геомагнитного поля: северной X , восточной Y , вертикальной Z и их производные по времени dX/dt , dY/dt , dZ/dt соответственно. Для магнитной обсерватории «Алма-Ата» использовались данные полного вектора T и производная по времени dT/dt .

Результаты. Рассмотрим геомагнитные пульсации, связанные с исследуемым землетрясением и время их возникновения в зависимости от расстояния до сейсмического источника. Согласно данным геологической службы USGS, толчок, мощностью $M_w=6.9$, произошёл 22 января 2024 года в 18:09:04 (UTC), на глубине около 13 км. (<https://earthquake.usgs.gov/>). На рисунке 2 представлены результаты измерений станций, расположенных наиболее близко к эпицентру землетрясения (см. табл. 1).

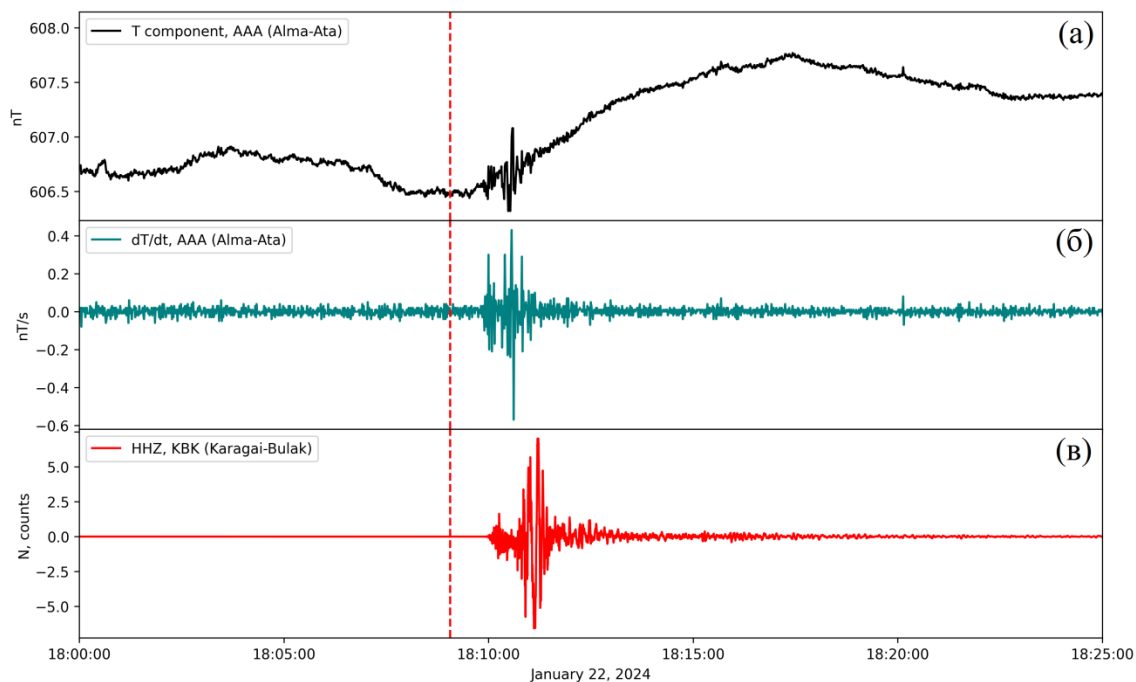


Рисунок 2. Вариации полного вектора магнитного поля T , нТл (а) и скорость изменения геомагнитного поля dT/dt , нТл/с (б) по данным магнитной обсерватории «Алма-Ата» (ААА), Казахстан. Волновые формы землетрясения по данным сейсмостанции «Карагай-Булак» (КВК), Кыргызстан (в). Красная пунктирная линия – время землетрясения с $M_w=6.9$ – 18:09:04 (UTC).

Из рисунка 2 видно, что вариации полного вектора магнитного поля T (рисунок 2 (а)), скорость изменения геомагнитного поля dT/dt (рисунок 2 (б)) по данным станции «Алма-Ата» и волновая форма сейсмического события (рисунок 2 (в)) по данным

сейсмостанции «Карагай-Булак» (КБК) возникают синхронно через несколько секунд после землетрясения.

По результатам обработки сейсмических событий, представленным в бюллетене международного сейсмологического центра (ISC: On-Line Bulletin <https://www.isc.ac.uk/>), можно определить точное время вступления Р-волны землетрясений. На Корейской сейсмостанции «Тэејон» (TJN) вступлению Р-волны Учтурфанского землетрясения соответствует время 18:16:20 UTC (рисунок 3). Вариации Х-компоненты и её производной на магнитной обсерватории «Cheongyang» (CYG) в Корее (рисунок 3 (а), (б)) возникают через несколько минут после вступления Р-волны, зафиксированной на сейсмостанции «Тэејон» (TJN) (рисунок 3 (в)), что обусловлено различным расстоянием магнитной обсерватории и сейсмостанции до эпицентра.

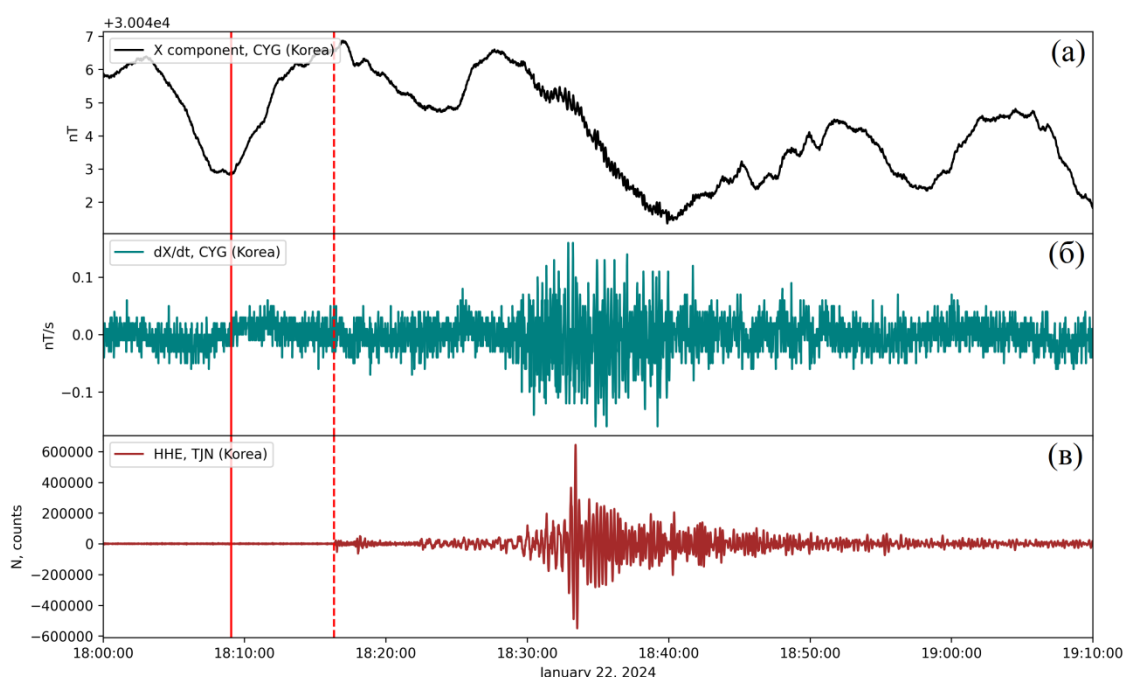


Рисунок 3. Вариации Х-компоненты (а) и скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (б) по данным магнитной обсерватории «Cheongyang» (CYG), Korea. Волновая форма землетрясения по данным сейсмостанции «Тэејон» (TJN), Korea (в). Красная сплошная линия – время землетрясения с $M_w=6.9$ – 18:09:04 (UTC), красная пунктирная линия – время вступления Р-волны на сейсмостанции TJN – 18:16:20 UTC.

На рисунках 4 и 5 представлены геомагнитные вариации Х-компоненты (чёрным цветом) и скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (зелёным цветом) с геомагнитных станций, а также волновая форма землетрясения (красным цветом) с сейсмостанций, расположенных наиболее близко к соответствующим магнитным обсерваториям. Магнитная обсерватория «Nurmijarvi» (NUR) (рисунок 4 (а), (б)) и сейсмостанция «Oulainen» (OUF) (рисунок 4 (в)) для Финляндии, магнитная обсерватория «Tihany» (THY) (рисунок 5 (а), (б)) и сейсмостанция «Magyarólan» (MPLH) (рисунок 5 (в)) для Венгрии. Вертикальной пунктирной линией отмечено время события. Частота дискретизации данных магнитных обсерваторий составляет 1 Гц.

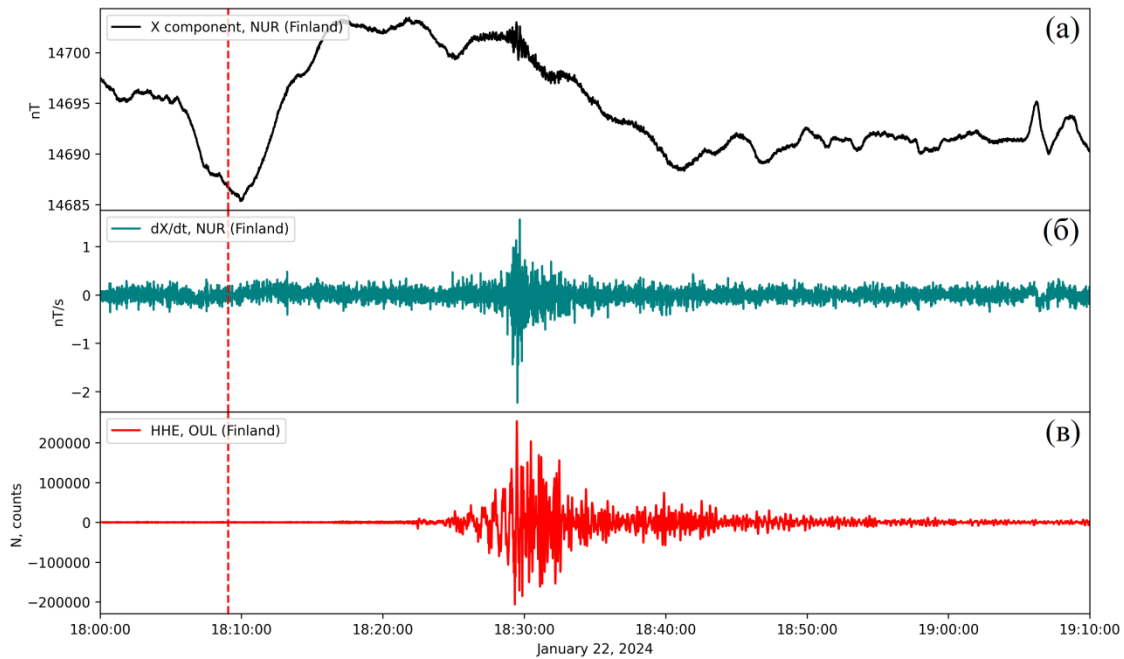


Рисунок 4. Вариации X-компоненты (а) и скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (б) по данным магнитной обсерватории «Nurmijarvi» (NUR), Finland. Волновая форма землетрясения по данным сейсмостанции «Oulainen» (OUF), Finland (в). Красная пунктирная линия – время землетрясения с $M_w=6.9$ – 18:09:04 (UTC).

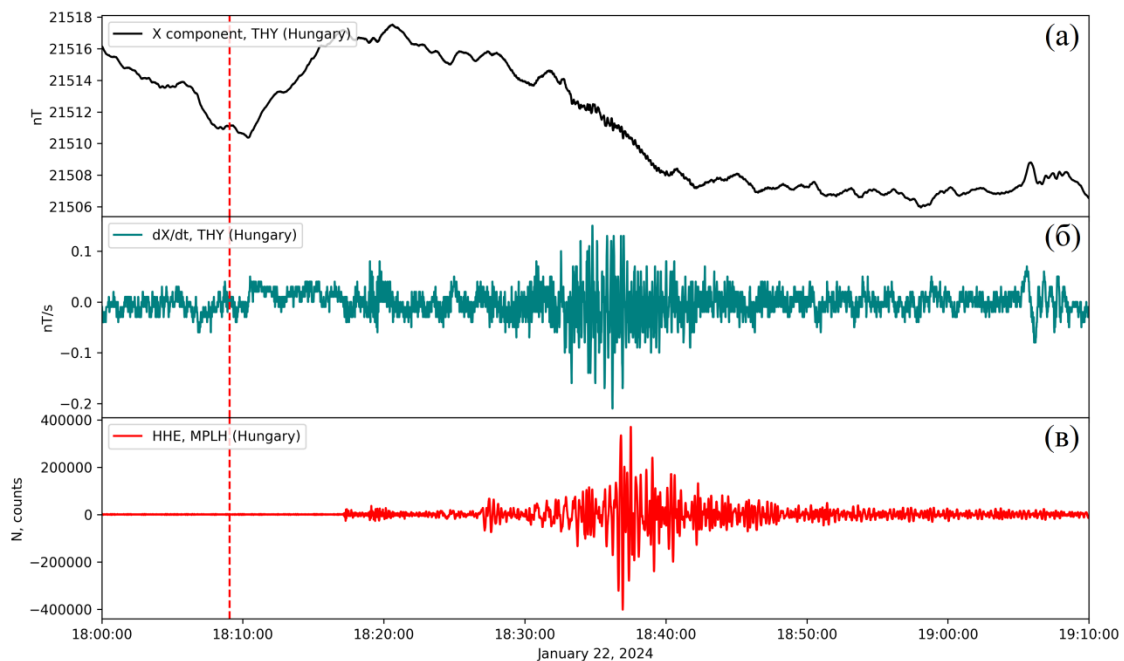


Рисунок 5. Вариации X-компоненты (а) и скорость изменения геомагнитного поля dX/dt (б) по данным магнитной обсерватории «Tihany» (THY), Hungary. Волновая форма землетрясения по данным сейсмостанции «Magyarpolany» (MPLH), Hungary (в). Красная пунктирная линия – время землетрясения с $M_w=6.9$ – 18:09:04 (UTC).

Из графиков видно, что аномалии в геомагнитных вариациях проявляются в виде отдельных изолированных всплесков с их последующим затуханием. На исходных данных геомагнитного поля выделяются отличающиеся от типичного хода вариации (рисунки 2–5 (а)), но значительно лучше геомагнитный сигнал прослеживается на записях скорости изменения геомагнитного поля (рисунки 2-5 (б)). Несмотря на значительную удалённость

геомагнитных станций CYG (рисунок 3 (а), (б)), NUR (рисунок 4 (а), (б)), THY (рисунок 5 (а), (б)) от эпицентра землетрясения, зарегистрированные магнитные пульсации проявляются с той же степенью выраженности, что и на станции AAA (рисунок 2 (а), (б)), расположенной в непосредственной близости к источнику сейсмического события.

Рассмотрим более детально вариации X, Y, Z – компонент геомагнитного поля по данным геомагнитных обсерваторий сети INTERMAGNET и сравним их (рисунок 6).

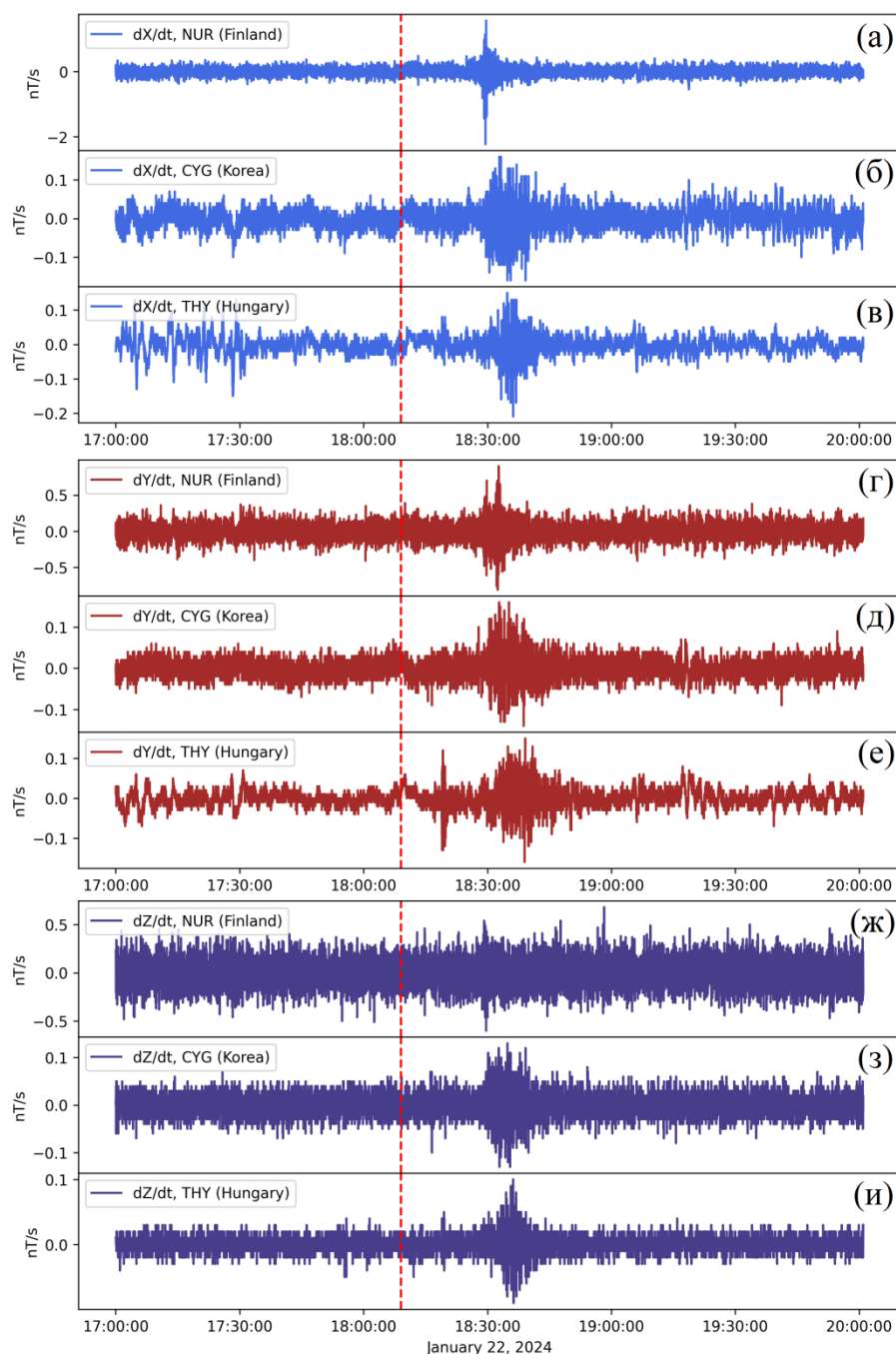


Рисунок 6. Графики скорости изменения компонент геомагнитного поля: dX (синим цветом), dY (красным цветом) и dZ (фиолетовым цветом) по данным магнитных обсерваторий NUR, Finland (а, г, ж), CYG, Korea (б, д, з) и THY, Hungary (в, е, и). Красная пунктирная линия – время землетрясения с $M_w=6.9$ – 18:09:04 (UTC).

Из рисунка 6 видно, что для всех станций сети INTERMAGNET наибольшие значения амплитуды сигнала фиксируются на записях горизонтальных компонент dX/dt и dY/dt . На обсерватории NUR (рисунок 6 (а), (г), (ж)) наблюдается наибольшая амплитуда вариаций X -компоненты и изменяется в пределах от -2.23 до 1.55 нТл/с; для Y -компоненты амплитуда немного ниже и изменяется от -0.8 до 0.9 нТл/с; для Z -компоненты значение амплитуды составляет от -0.13 до 0.13 нТл/с. На обсерватории CYG (рисунок 6 (б), (д), (з)) несмотря на то, что она находится ближе к эпицентру, по сравнению с NUR и THY, амплитуды X и Y компонент имеют меньшее значение и лежат в диапазоне от 0.16 до -0.16 нТл/с и от 0.16 до -0.14 нТл/с соответственно. Для Z -компоненты значение составляет -0.13 до 0.12 нТл/с. Обсерватория THY (рисунок 6 (в), (е), (и)) является самой отдалённой от эпицентра, её значение амплитуды для X -компоненты составляет от -0.21 до 0.15 нТл/с, для Y -компоненты от -0.16 до 0.15 и для Z -компоненты от -0.09 до 0.1 нТл/с.

Сравнительный анализ геомагнитных откликов, зарегистрированных в ходе землетрясения, показывает, что временные характеристики возникновения и динамики изменения сигнала совпадают для рассматриваемого сейсмического события. Это наблюдается как в исходных данных компонент геомагнитного поля, так и в записях их производных. Формирование подобных геомагнитных возмущений является результатом совокупного воздействия ряда факторов, среди которых ключевыми являются магнитуда сейсмического события, параметры и глубина его очага, геологическое строение региона, а также физико-механические свойства горных пород и массива.

Стоит отметить, что согласно современным представлениям, выделяют ряд основных физических механизмов возбуждения геомагнитных вариаций при землетрясениях [9]. При прохождении сейсмических волн через магнитоупорядоченные горные породы возникают электрические токи, которые, в свою очередь, генерируют магнитные поля [10]. Этот процесс приводит к регистрации вариаций магнитного поля, синхронных с сейсмическими колебаниями. Электромагнитные явления, включая магнитные пульсации, можно отнести к электрокинетическим и сейсмическим динамо-эффектам. Эти механизмы включают движение или сдвиги проводящих структур в магнитном поле Земли, которые параллельно генерируют электромагнитные сигналы во время сейсмических событий. Предполагается, что эффект движущейся индукции (Motional Induction) является наиболее вероятным механизмом генерации переходных малоамплитудных магнитных сигналов во время землетрясений [11]. Эффект растрескивания хрупких и полухрупких структур земной коры, в связи с быстрым изменением напряжения среды, также способствует генерации подобных магнитных аномалий [12].

Заключение. Аномальные вариации геомагнитного поля, наблюдаемые в обсерваториях, расположенных на различных расстояниях от очага землетрясения, имеют довольно похожий и практически синхронный характер относительно прихода сейсмической волны на сейсмостанцию. Явной зависимости между амплитудой наблюдаемого сигнала и удалённостью геомагнитной обсерватории от эпицентра не наблюдается. Геомагнитный эффект, связанный с землетрясением 22 января 2024 года с магнитудой $M_w=6.9$ в исходных записях компонент геомагнитного поля и их производных идентичен по времени возникновения и изменения сигнала. Наибольшая амплитуда сигнала (от -2.23 до 1.55 нТл/с) достигается на записях горизонтальных компонент dX/dt , dY/dt , наименьшая характерна для вертикальной компоненты dZ/dt (от -0.09 до 0.1 нТл/с). Рассмотренные геомагнитные отклики на землетрясение связаны с приходом сейсмической волны, что подтверждается записями волновой формы, зарегистрированной на ближайших к магнитным обсерваториям сейсмических станциях.

Авторы выражают благодарность рецензенту статьи, а также заведующему лабораторией геомагнитных исследований Института ионосферы г. Алматы Андрееву А. Б. за помощь в подготовке статьи.

Результаты, представленные в данной работе, получены в рамках выполнения государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (Рег. номер 1021052806454-2-1.5.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро В. А. Сейсмомагнитный эффект / В. А. Шапиро // Известия АН СССР. Физика Земли. М.: Наука. – 1966, – Т.8.
2. Ахвердян Л. А. Наблюдения сейсмомагнитного эффекта у очага Зангезурского землетрясения / Л. А. Ахвердян // Доклады академии наук Армянской ССР. – 1969.
3. INTERMAGNET. Technical Reference Manual. Руководство и описание методов сбора и обработки данных сети INTERMAGNET, используемых для мониторинга вариаций магнитного поля Земли. URL: <https://intermagnet.org/> (дата обращения 01.02.25)
4. Лазарева Е. А. Анализ вариаций геомагнитного поля в период турецких землетрясений в феврале 2023 года / Е. А. Лазарева // Вестник Института Сейсмологии Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. 2024. № 2 (24). С. 35–42.
5. Адушкин В. В. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов / В. В. Адушкин, С. А. Рябова, А.А. Спивак. // М.: Издательство ГЕОС. – 2021. – 264 с. DOI: 10.34756/GEOS.2021.16.37855. EDN AAGOKF
6. Soloviev A.A. Geomagnetic Effect of the Earthquakes with $M_w = 7.5-7.8$ in Turkey on February 6, 2023. / A.A. Soloviev // Earth Sc. – 2023. – № 511. – P. 578–584
7. Соколова И. Н. Сильное землетрясение 22 января 2024 г. с $M_w=7.0$ на юге Тянь-Шаня / И. Н. Соколова, И. П. Габсатарова, А.В. Берёзина, И. Л. Аристова // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 1. – С. 42–64. DOI: 10.35540/2686-7907.2024.1.03. EDN: KHSGBI
8. INTERMAGNET Operations Committee and Executive Council, INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 5.0.0, Ed. by B. St-Louis 2020. URL: https://www.academia.edu/95527147/INTERMAGNET_Technical_Reference_Manual_Version_5_0_0 (дата обращения 01.02.25)
9. Адушкин В. В. Магнитные эффекты двойного землетрясения 16.03.2022 г. (Япония). Результаты наблюдений / В. В. Адушкин, А. А. Спивак, Д. Н. Локтев, Ю.С. Рыбнов, А. В. Тихонова // Физика Земли. – 2023. – № 5. – С. 159–168.
10. Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, – 2000. – 448 с
11. Zhao J. Electromagnetic Field Generated by an Earthquake Source Due to Motional Induction in 3D Stratified Media, and Application to 2008 M_w 6.1 Qingchuan Earthquake. / J. Zhao, Y. Gao, J. Tang, S. Klemperer, J. Wen, C. Chen, J. Chong // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2021. – № 126. DOI: 10.1029/2021JB022102.
12. Venegas-Aravena P. A review and upgrade of the lithospheric dynamics in context of the seismo-electromagnetic theory / P. Venegas-Aravena, E. G. Cordaro, D. Laroze // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2019. – Vol. 19, № 8. – P. 1639–1651. DOI:10.5194/nhess-19-1639-2019.

Рецензент: к.ф.-м.н. Кузиков С. И.